

exécution d'une fouille profonde en rocher pour l'usine hydro-électrique de Sault-Brénaz

rock excavation for Sault-Brénaz hydroelectric powerhouse

G. LOMBARD - J.C. ROSOLEN*

P. BRIGLIA**

F. VANDAME***

Résumé

La réalisation de l'aménagement hydro-électrique de Sault-Brénaz a nécessité le creusement d'une fouille rocheuse de 35 m de profondeur à parois verticales, de dimensions suffisantes (70 m × 40 m) pour servir d'assise à l'usine.

Des études géologiques de détail et des études d'hydrogéologie ont permis de trouver des solutions aux problèmes posés par les soutènements, les venues d'eau et l'environnement.

Les travaux, qui ont comporté l'excavation de 250 000 m³ de déblais rocheux à l'explosif, ont été effectués en six mois. Les parois verticales ont été prédécoupées, puis consolidées par boulonnage. Un dispositif d'auscultation a permis de vérifier la stabilité du massif calcaire et de détecter le glissement local d'un banc qui a pu ainsi être purgé à temps. Une partie des déblais rocheux a pu être récupérée pour réaliser les protections de berge de l'aménagement.

Abstract

To achieve the hydro-electric scheme of Sault-Brénaz, it was necessary to dig a 35 m depth rock excavation with vertical sidewalls, large enough (70 m × 40 m) to accomodate for the power plant.

Detailed geological and hydrogeological studies brought solutions to support design, water seepage and surroundings problems.

Works including 250.000 m³ of rockblasting were completed in six months. Fine presplitting technics were used for vertical sidewalls, together with rockbolting support.

A monitoring device allowed checking of limestone walls stability and brought evidence of local slipping of one limestone-bed which was therefore cleared out on time. Part of rock spoil was reused as rip rap along the banks.

* Compagnie nationale du Rhône, 2, rue André-Bonin, 69316 Lyon Cedex 04.

** Bureau de recherches géologiques et minières, 43, boulevard du 11-Novembre, BP 6083, 69604 Villeurbanne Cedex.

*** Entreprise Razel, Christ de Saclay, BP 109, 91403 Orsay Cedex.

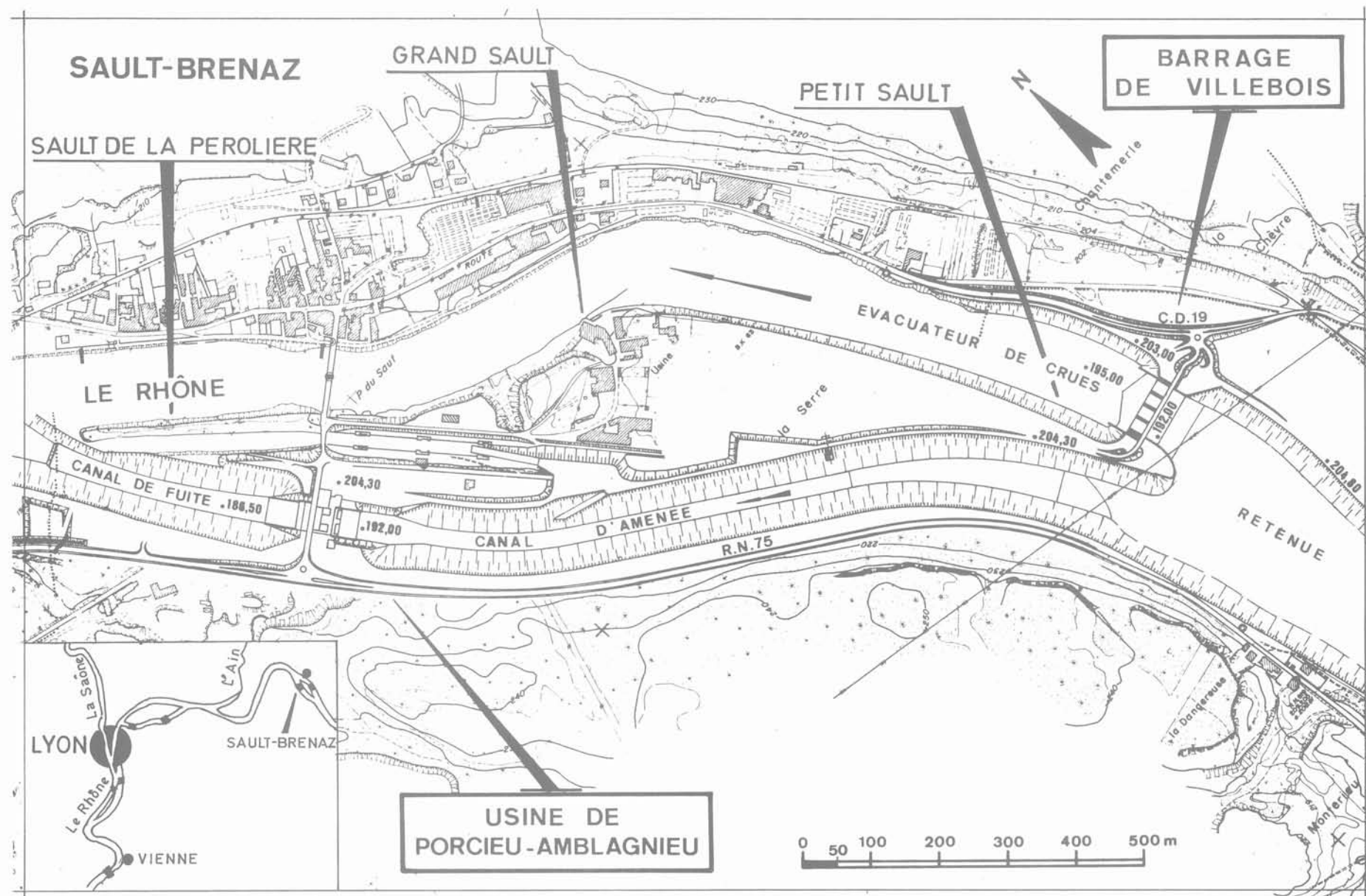


Fig. 1. — Plan de l'aménagement.

I. INTRODUCTION

L'aménagement de Sault-Brénaz ; que réalise actuellement la Compagnie Nationale du Rhône, intéresse un tronçon du Rhône situé entre 60 et 90 km à l'amont de Lyon.

Il s'agit d'un aménagement de basse chute qui comprend essentiellement (fig. 1) :

- un barrage mobile, implanté en rive droite du fleuve, permettant de relever d'environ 6 m le niveau d'étiage de manière à créer une retenue de 28 km de longueur, endiguée dans sa partie aval ;

- une courte dérivation en rive gauche permettant de court-circuiter un tronçon du fleuve dans lequel des affleurements rocheux créent une zone de rapides (les « Saults ») ;

- une usine hydro-électrique, implantée sur cette dérivation, équipée de deux groupes à axe horizontal du type bulbe capables d'absorber chacun un débit de 350 m³/s sous une chute moyenne de 7,50 m ;

- divers travaux de rétablissements de communications, de protection contre les crues et d'insertion dans le site.

Le barrage est fondé en rive droite du Rhône sur un môle rocheux.

L'usine, située en rive gauche à proximité du pont de Sault-Brénaz, est assez profondément encastrée dans un massif de rocher calcaire (fig. 2).

Ce sont essentiellement les problèmes liés à la réalisation de cette fouille rocheuse (250 000 m³) qui sont présentés ci-après.

2. RECONNAISSANCE ET ÉTUDES

2.1. Contexte géologique

Le site du projet de Sault-Brénaz se trouve dans le domaine jurassien de l'« Île Crémieu ». Il s'agit d'une table calcaire du Jurassique inférieur, très faiblement pentée vers le Sud-Est et limitée à l'Est par la faille de Villebois, qui la sépare du Jura plissé, situé en rive droite du Rhône.

Le Rhône a entaillé ce plateau suivant une direction S.S.-E.-N.N.-O. recoupant les couches calcaires des étages bathonien et bajocien. Des barres rocheuses, qui correspondent au franchissement de ces calcaires, entravent l'écoulement des eaux et pour certains débits apparaissent des « saults » torrentiels, d'où tirent leur nom la commune et l'aménagement.

La géologie est simple dans ses grandes lignes mais, à l'échelle des ouvrages, la morphologie du toit du rocher est compliquée du fait de l'érosion sous-glaciaire. Le relief a été en partie fossilisé par des dépôts d'alluvions ; il se caractérise par la présence de dômes calcaires, profondément entaillés par des

canons à parois presque verticales, de faible largeur mais dont la profondeur peut atteindre 60 à 100 mètres.

C'est sur de tels dômes que les fouilles des ouvrages (barrage et usine) ont été ouvertes.

2.2. Études géologiques préalables

A la fin du siècle dernier, le problème du franchissement des saults par la navigation avait été réglé par la construction d'une écluse, qui a été utilisée régulièrement jusqu'en 1928.

Le site a ensuite intéressé l'industrie hydro-électrique et les premières reconnaissances remontent à 1945.

Les premiers projets comportaient la construction d'une usine barrage dans le lit du fleuve, fondée sur l'un des seuils rocheux qui barrent le Rhône à l'amont du pont de Sault-Brénaz : Petit Sault ou Grand Sault.

Autour de 1955, une prospection de la rive gauche, notamment par des méthodes sismiques complétées par un certain nombre de sondages carottés, et un lever topographique précis ont permis de mettre en évidence, l'existence d'un canon profond et de définir en conséquence le tracé du canal d'amenée et l'implantation approximative de l'usine sur un môle rocheux situé entre le Rhône et le canon (fig. 5).

Des risques de circulation d'eau dans le calcaire ont été signalés dès cette époque (rapports géologiques de JACOB et GIGNOUX).

Le projet a été repris à partir de 1979 et une campagne complémentaire de sondages a été effectuée dans le but d'améliorer la connaissance des caractéristiques du rocher et de préciser la topographie du relief calcaire avec ses dômes et ses canons dissimulés par la couverture alluvionnaire.

Les résultats de cette campagne ont permis de préciser l'implantation des ouvrages en tenant compte également de considérations relatives au rétablissement de la R.N. 75 et de la route d'accès au pont de Sault-Brénaz, au déplacement des installations d'une entreprise locale de traitement de matériaux de construction, et du souci de minimiser le volume des déblais rocheux.

L'usine se trouve ainsi implantée à l'extrémité aval d'une sorte de plateau rocheux affleurant le terrain naturel, et se terminant par des falaises en formes de marches d'escalier. Elle constitue un massif en béton armé de 40 m de largeur et de 70 m environ dans le sens amont aval, fondé à 170 N.G.F. soit 35 m au-dessous du toit du rocher.

A l'amont, la partie terminale du canal d'amenée dont le fond est à 192 N.G.F. est creusée dans le rocher sur une longueur de 120 m. A l'aval de l'usine, le rocher plonge rapidement et le canal de fuite dont la longueur n'est que de 300 m est presque entièrement creusé dans les alluvions, avec un plafond à 186,50 N.G.F.

Les observations piézométriques dans les alluvions montrent que le niveau de la nappe est très sensible aux variations du Rhône, autour d'une cote moyenne de 196 N.G.F.

2.3. Études de la fouille.

Objectif et méthodologie

A l'issue de ces premières études, deux problèmes essentiels d'exécution sont apparus :

— forme à donner à la fouille rocheuse de manière à diminuer le volume de déblais pour des raisons de délais, et aussi d'emprises.

— disposition à adopter vis-à-vis des venues d'eau compte tenu du fait que le fond de fouille se situe à 25 m environ au-dessous du niveau du Rhône et se développe pour partie dans le dôme calcaire et pour partie dans les alluvions modernes.

Un problème connexe était de récupérer le plus possible de blocs rocheux pour les protections de berges (10/100 kg et 100/400 kg).

Il était donc nécessaire de connaître les caractéristiques mécaniques et hydrauliques du matériau et pour cela on a réalisé successivement :

- une étude géologique de détail permettant de définir le plus finement possible la topographie du calcaire sous les alluvions et de classer en faciès les terrains traversés d'après leur lithologie,
- une étude de fracturation sur affleurement pour apprécier les conditions de stabilité des parements rocheux globalement et par faciès et approcher une perméabilité du milieu rocheux, globalement et par faciès,
- une étude d'hydraulique souterraine pour approcher la perméabilité en grand du milieu rocheux, simuler les écoulements et évaluer l'effet sur les venues d'eau d'un éventuel écran étanche dans les alluvions, voire d'un voile dans le rocher,
- une étude des caractéristiques mécaniques des matériaux pour examiner les conditions d'abattage et de soutènement et définir les méthodes de réalisation, globalement et par faciès.

2.4. Moyens mis en œuvre pour les études et résultats obtenus

L'étude géologique de détail a comporté une synthèse des renseignements fournis par les forages et sondages existants et par des levés géologiques sur affleurements, une reconnaissance géophysique et une reconnaissance complémentaire par forages destructifs avec enregistrement de paramètres et sondages carottés au droit de la fouille projetée.

Deux aspects particuliers des reconnaissances méritent d'être soulignés :

• **la sismique réfraction** a été utilisée à partir d'un tir en forage à 36 mètres de profondeur, soit à 20 mètres sous le toit du calcaire. A partir de ce forage seize profils de six géophones et quatre profils de douze géophones étaient dressés de manière radiale. Ce dispositif a permis d'éviter les effets liés à la diffraction des ondes lors de fortes ruptures de pentes.

• en liaison avec l'étude de fracturation afin de valoriser au mieux les forages, des diagraphies instantanées (vitesse d'avancement), des **diagraphies différées** (diamètreur, neutron, gamma-gamma-gamma-ray) ont été réalisées. Cela a permis d'identifier les discontinuités en forages et notamment celles qui étaient potentiellement aquifères (fig. 2).

Grâce à cette identification, les forages ont pu alors être équipés en piézomètres ponctuels (à chambre isolée) au droit des discontinuités reconnues.

L'étude de la **fracturation** a été effectuée essentiellement sur l'affleurement dans des carrières voisines qui recoupent les faciès calcaires rencontrés par l'excavation.

Ces affleurements ont été systématiquement levés en repérant toutes les discontinuités et leurs caractéristiques : type d'élément structural, direction, pendage, épaisseur de la discontinuité, nature du remplissage, continuité, degré d'ouverture libre, venue d'eau, écartement des fractures, rugosité.

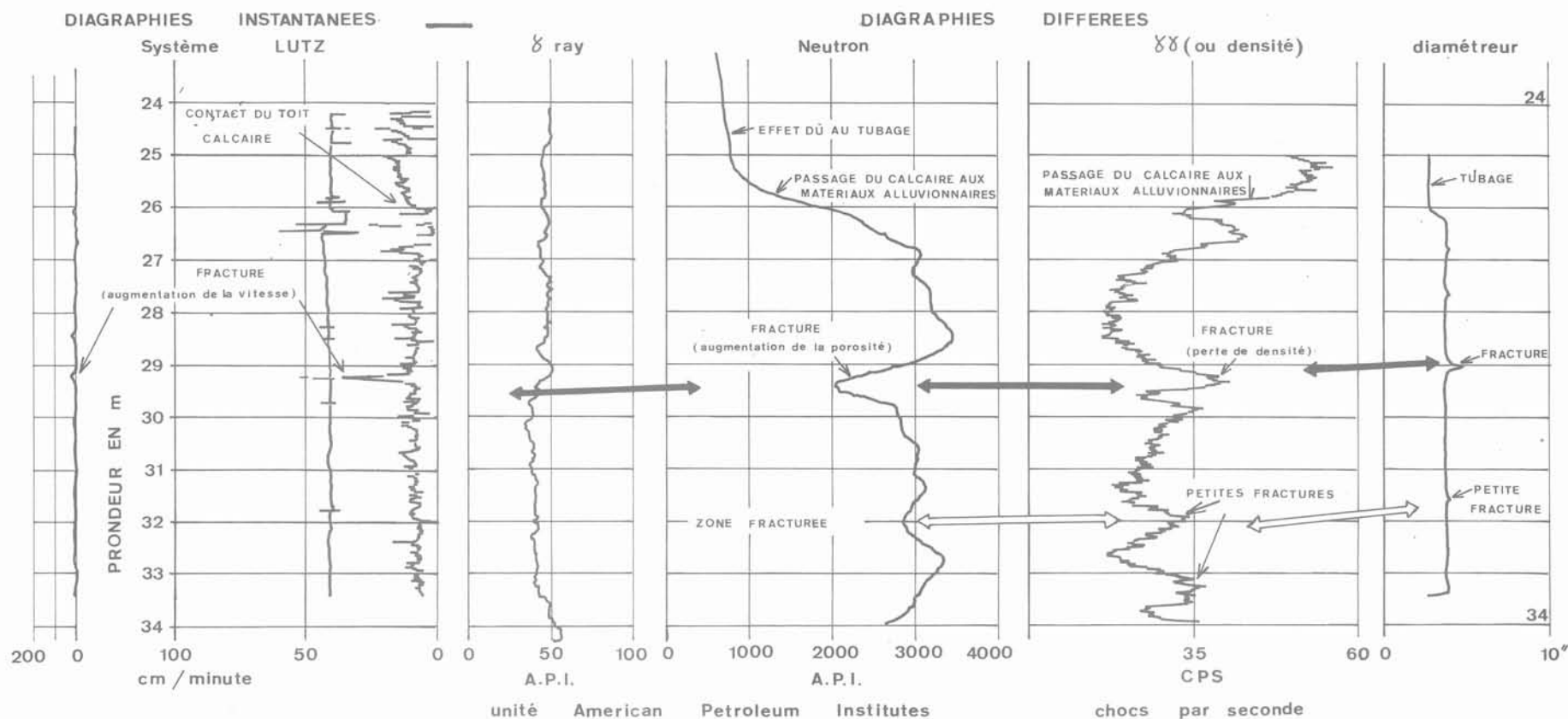
L'ensemble de ces données a été traité par ordinateur à l'aide d'un programme de tri permettant une pondération et des sorties automatiques de diagrammes de SCHMIDT avec courbes d'égales densité.

A l'aide de ces diagrammes, les principales familles de discontinuités ont été définies, et une évaluation de la perméabilité induite par la fracturation a été réalisée, en tenant compte de ce que la perméabilité d'une fracture dépend, grossièrement, du cube de son épaisseur, de sa continuité, de la nature de son remplissage. Il a fallu évidemment éliminer les fractures importantes qui correspondent à des venues d'eau localisées. La perméabilité de la matrice rocheuse trouvée ainsi par le calcul varie de 10^{-2} m/s à 10^{-4} m/s. Pour les familles principales les espacements entre fractures moyens calculés sont de l'ordre du mètre ce qui indique un réseau très serré.

L'étude d'**hydraulique souterraine** a consisté dans un premier temps à évaluer la perméabilité en grand du massif calcaire au moyen de quatre essais de pompages de longue durée (48 à 70 heures environ). L'influence des pompages était observée sur les forages équipés en piézomètres ponctuels. L'ensemble de l'essai était enregistré.

Les résultats obtenus ont été les suivants :

- puits n° 1 : $5 \cdot 10^{-5}$ m/s ;
- puits n° 4 : $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s ;
- puits n° 3 : $2 \cdot 10^{-4}$ m/s ;
- puits n° 2 : $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.



Diagraphies instantanées LUTZ : la vitesse d'avancement est reportée à grande échelle sur la droite, et à plus petite échelle sur la gauche. La courbe intermédiaire représente la pression de poussée sur l'outil.

Diagraphie gamma-ray : indication sur la teneur en argile du milieu par comptage des atomes d'uranium, de thorium et de potassium (radioactivité naturelle).

Diagraphie neutron : la sonde effectue un comptage d'atomes d'hydrogène qui permet d'avoir la teneur en eau des terrains en place (donc la porosité).

1 000 A.P.I. = calcaire de porosité 19 %
1 800 A.P.I. = calcaire de porosité 2 %

Diagraphie gamma-gamma : la sonde effectue un comptage des collisions entre les rayons gamma émis par la source et les électrons contenus dans le terrain en place.

10 C.P.S. = densité 2,6
60 C.P.S. = densité 2.

Diagraphie diamètre : le diamètre signale de manière nette sur fracture à 29 m de profondeur environ, avec des lèvres écartées de 50 mm à la paroi du forage et pratiquement refermées à 25 mm au-delà de la paroi du forage. Noter aussi au-dessus de 26 m la présence du tube P.V.C.

Fig. 2. — Exemple de valorisation d'un forage par diagraphies.

TABLEAU I

Critères d'identification géologique et de classification géotechnique des calcaires de Sault-Brénaz - faciès n° 8.

Géologie	Étage		Bajocien J1a		
	Lithologie		Calcaire plus ou moins grossier à entroques (« taille » des carriers)		
	Épaisseur		10,50 à 7,50 m		
	Bancs		10 à 50 cm, bien marqués, compacts		
Géotechnique	iden- tif.	Densité sèche	2,62 (8 mesures)		
		Porosité	avant gel 2,85 % (8 mes.)		après gel 4,05 % (4 mes.)
	Propriétés mécaniques	Résistance à la compression Rc en MPa	106 (3 essais)		
		Résistance à la traction (brésilien) Rtb en MPa	avant gel : 6,0 (4 essais)		après gel 4,9 (4 es.)
		Module E en MPa	60 000		
		Module dynamique Ed en MPa			
		Indice Franklin It en MPa	Nbre essais 51	It diamétral 4,26	It axial 6,36
		Vitesse sismique VI	In situ : 5 000 m/s	en labo avant gel 5,587 après gel 2,977	
		Indice de qualité*	avant gel : 86 %		après gel : 46 %
	Sensi- bilité	Fragmentation dynamique FD	avant gel : 35,4 (10/14 mm) 37 (4/6,3 mm) après : 40,4 (4/6,3 mm)		
		Gélivité	Rtb : 0,82 VI : 0,53 FD : 1,09		
	Fractu- ration	R.Q.D.	Nb mesures : 97	moyenne : 92,2	écart type : 13,5
		Fracturation in situ	N.10-70 à 90W - N.110-60 à 90W - N.140-60 à 90W		
		Distance interfracturale			

* L'indice est calculé à partir de la vitesse des ondes dans le cristal de calcite (6 500 m/s).

* L'indice est calculé à partir de la vitesse des ondes dans le cristal de calcite (6 500 m/s).

Un doute subsistait cependant pour les puits 3 et 2 compte tenu de la présence d'alluvions en partie supérieure susceptibles d'alimenter verticalement le puits malgré l'existence d'un bouchon.

A la suite de ces pompages et des indications de l'étude de fracturation, une première série de calculs analytiques a été faite à partir des formules de SCHNEEBELI. La valeur la plus probable du débit total a été obtenue en affectant un poids de 60 % à la perméabilité de 10^{-5} m/s et 40 % à la valeur 10^{-4} m/s pour les calcaires, et pour les alluvions un poids de 60 % à 10^{-3} m/s et de 40 % à 10^{-4} m/s. Le débit estimé atteindrait ainsi 12 500 m³/h ce qui est considérable. On a ensuite étudié le cas où la traversée des alluvions serait entièrement obturée par une paroi étanche et où les venues d'eau ne se feraient qu'à travers le rocher ; le débit calculé tombe alors à 3 600 m³/h.

Pour estimer l'influence d'un voile étanche dans les calcaires, un modèle aux éléments finis axisymétrique bidimensionnel a été élaboré. Ce modèle a fait apparaître que pour réduire de moitié le débit de pompage le plus probable, c'est-à-dire pour obtenir un débit calculé de 1 800 m³/h, il faudrait, si la perméabilité du cal-

caire était isotrope, descendre le voile à 50 m en dessous du niveau du fond de fouille.

Des essais LUGEON ont pu être réalisés ultérieurement dans deux forages, ils ont fait apparaître deux zones dans le massif calcaire : de 0 à 35 m de profondeur la perméabilité est de l'ordre de 10^{-4} m/s ; de 35 à 50 m la perméabilité est plus homogène et plus faible, de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$ à $4 \cdot 10^{-7}$ m/s.

En tenant compte de ces nouvelles données et sans voile étanche dans le calcaire, la valeur fournie par la simulation numérique n'est plus que de 1 300 m³/h.

Parallèlement à ces calculs de débits en perméabilité équivalente, l'accent a été mis sur la présence éventuelle de conduits karstiques susceptibles de se décolmater pendant les terrassements et de donner lieu à des venues d'eau supplémentaires.

La **caractérisation mécanique** des matériaux a consisté à établir pour chacun des faciès identifiés recoupés par le terrassement « une carte d'identité » complète (exemple tableau I) à partir des observations faites sur le terrain et des résultats des essais de laboratoires sur carottes (de sondage ou d'affleurement).

Les faciès intéressant la fouille de l'usine sont au nombre de 6 (faciès n°s 6 à 11) ; les faciès supérieurs (n°s 1 à 5) correspondent à d'autres ouvrages dans l'aménagement.

Une attention particulière a été portée sur la gélivité de la roche et sur sa fracturation à l'échelle micro et macrostructurale.

En tenant compte des éléments structuraux trouvés ci-avant cette caractérisation a permis d'établir deux classifications :

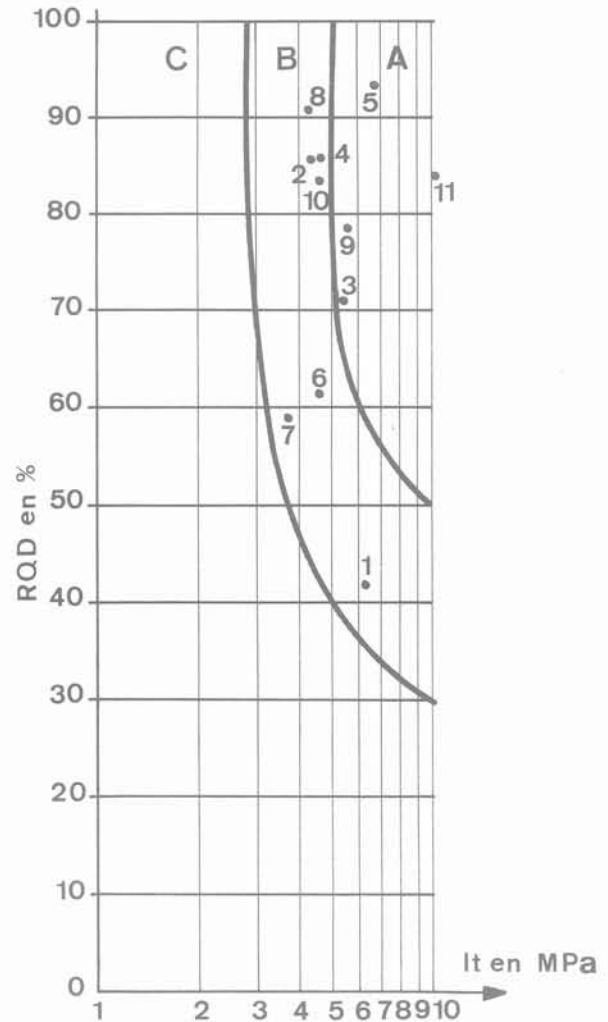
La première concerne l'**abattage** à partir du R.Q.D., pourcentage des morceaux de carotte dont la longueur est supérieure à 10 cm (rock quality designation) et à partir de l'indice Franklin, (It.), résistance sous charge ponctuelle de la roche (fig. 3).

L'ensemble des faciès calcaires étant classé en B (compact fracturé) l'abattage doit être réalisé à l'explosif mais avec prédécoupage et découpage soignés.

L'autre concerne le type de **soutènement**, à partir du degré de fracturation au niveau du massif et d'un critère de hauteur des parois (fig. 4). En effet, le R.Q.D. établi à partir de sondages verticaux ne tient systématiquement pas compte des discontinuités subverticales pourtant les plus importantes vis-à-vis de la stabilité des parois de l'excavation.

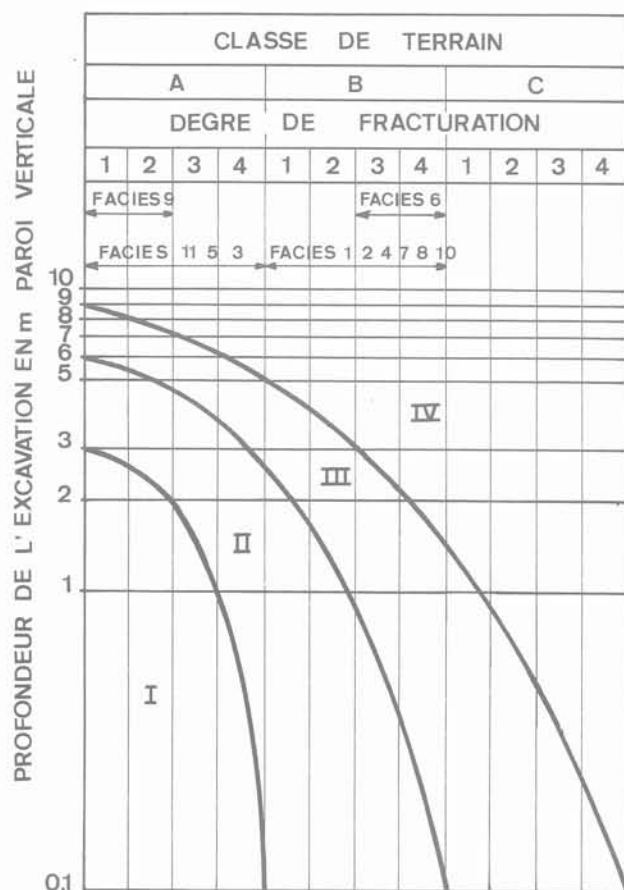
Au vu de cette classification, l'ensemble de la fouille, compte tenu de sa hauteur, doit être soutenue par boulons (densité et longueur suivant fracturation) dans les parties ultérieurement bloquées par la construction de l'ouvrage, et par boulons et treillis soudé associé à du béton projeté dans les zones où le rocher constitue le parement définitif.

Un calcul de stabilité prenant en compte les principales familles de discontinuités a conduit à recommander l'emploi de boulons passifs Ø 25 mm à scellement réparti de 5 m de long en tête de fouille, puis de 3 m de long sur le reste du parement avec une densité de 1 boulon par 4 m².



CLASSF. DE TERRAIN	NATURE DU TERRAIN	MODE D'ABATTAGE
A	Compact, peu fracturé	Excavation à l'explosif
B	Compact, fracturé ou moyennement résistant	Excavation à l'explosif avec prédécoupage ou découpage soigné
C	Compact très fracturé ou très peu résistant	Excavation mécanique au ripper Dislocation éventuelle à l'explosif Finition au brise roche hydraulique ou Excavation à la machine à attaque ponctuelle

Fig. 3. — Diagramme de classification des sous-faciès pour l'exécution des terrassements.



En outre cette caractérisation a permis d'indiquer que les matériaux calcaires seraient récupérables pour des usages de type remblais ou protection. Toutefois l'importante microfissuration et la sensibilité au gel et aux chocs, mise en lumière par les essais, inciteraient à la prudence vis-à-vis du taux de récupération à espérer selon la granularité demandée.

3. PROBLÈMES POSÉS PAR LE PROJET

Le problème posé par le projet était de réaliser en toute sécurité, dans le minimum de temps, avec le minimum de surface d'emprises et à proximité d'une zone habitée, une fouille rocheuse de 35 m de profondeur de dimensions suffisantes (70 m × 40 m) pour servir d'assise à l'usine projetée, en tenant compte en outre des contraintes liées à la présence d'une nappe phréatique et de l'intérêt de récupérer les matériaux extraits pour servir de protections de berges sur l'aménagement.

3.1. Exiguïté du site

Pour libérer le site il a fallu dévier la R.N. 75 de manière à la faire passer le plus près possible des escarpements de rive gauche, et établir, entre cette voie et le pont de Sault-Brénaz, une liaison provisoire comprenant un passage inférieur qui évite les croisements entre circulation publique et circulation de chantier.

La largeur disponible entre la R.N. 75 déviée et l'ancienne écluse de Sault-Brénaz ne dépasse cependant pas 150 m ; il est apparu souhaitable de raidir le plus possible les talus de la fouille rocheuse pour conserver des plates-formes pour installations de chantier.

Cela conduit à la classification suivante :

ZONE	MODE D'EXÉCUTION	SOUTÈNEMENT
I	Tir traditionnel	rocher nu
II	Tir avec prédécoupage ou découpage soigné	rocher nu
III	Tir avec prédécoupage ou découpage soigné et/ou réglage au brise-roche hydraulique	Boulonnage (densité et longueur des boulons suivant fracturation)
IV	Tir avec prédécoupage ou découpage soigné et/ou réglage au brise-roche hydraulique	Boulonnage + treillis soudé (densité et longueur des boulons suivant fracturation)

En cas de venues d'eau en classes III et IV, l'utilisation de béton projeté ou de résine projetée est à prévoir.

Fig. 4. — Diagramme de classification géotechnique pour la tenue des parois, le mode d'exécution et le soutènement.

3.2. Précautions contre les venues d'eau

Les études hydrauliques ont montré que le site dans lequel doit être creusé la fouille de l'usine est baigné par une nappe dont le niveau moyen (196) s'établit à env. 8 m sous le terrain naturel et 26 m au-dessus du fond de fouille. Cette nappe qui règne aussi bien dans les formations rocheuses que dans les terrains alluvionnaires est fortement influencée par les fluctuations du niveau du Rhône, qui n'est distant que de 200 m. Les études ont également fait apparaître l'intérêt d'obtenir par un écran étanche, la couche d'alluvions graveleuses qui recouvre le rocher à l'aval de la fouille, la perméabilité des alluvions est en effet environ 10 fois plus forte que celle du rocher. Cet écran d'une longueur de 260 m est constitué par une paroi moulée de 0,60 m d'épaisseur, dont la profondeur varie de 2 m à 31 m, il se referme à l'amont sur le rocher affleurant et ne se développe ainsi que sur la moitié aval du périmètre de la fouille ; il est ancré et prolongé par des injections dans le rocher sous jacent afin d'éviter tout risque de renard.

En ce qui concerne les venues d'eau à travers le rocher, il a été prévu de les pomper. La possibilité de recouper des conduits karstiques a incité d'ailleurs à une grande prudence dans l'estimation des débits à évacuer.

3.3. Projet de terrassement

La quasi-horizontalité du pendage des couches rocheuses, et les caractéristiques mécaniques satisfaisantes de la plus grande partie des faciès rocheux ont permis d'envisager une fouille à parois verticales renforcées par boulonnage, avec une seule risberme en partie supérieure, ce qui résout les problèmes liés à l'exiguïté du site (fig. 5).

C'est ce principe qui a été proposé aux entreprises au moment de l'appel d'offres. Une telle forme d'excavation présente évidemment l'avantage de réduire au minimum le volume du rocher à extraire. Elle oblige par contre l'entrepreneur à apporter un soin extrême au prédécoupage des parements rocheux, et à la sécurité.

Le marché précisait les objectifs techniques :

- erreur maximale sur la verticalité ou le parallélisme des trous de prédécoupage ne dépassant pas 1 % ;
- hors profils n'ayant pas plus de 30 cm de profondeur au-delà du profil théorique, à moins d'accident géologique ;
- parois à consolider par boulonnage (à ancrage ponctuel ou à ancrage réparti) au fur et à mesure de l'avancement ;
- grillages de protection à prévoir systématiquement contre les parois de plus de 2 m de hauteur susceptibles de donner lieu à des chutes de pierres ;
- abattage à l'explosif arrêté à 50 cm du fond de fouille, et extraction du rocher terminée par réglage mécanique et mise à vif du rocher juste avant le bétonnage.

3.4. Autres contraintes

Le marché imposait à l'entrepreneur de trier les blocs utilisables en protection de berge, avant de les mettre en dépôt.

L'attention de l'entrepreneur était en outre attirée sur les contraintes spécifiques du site, liées à la présence de

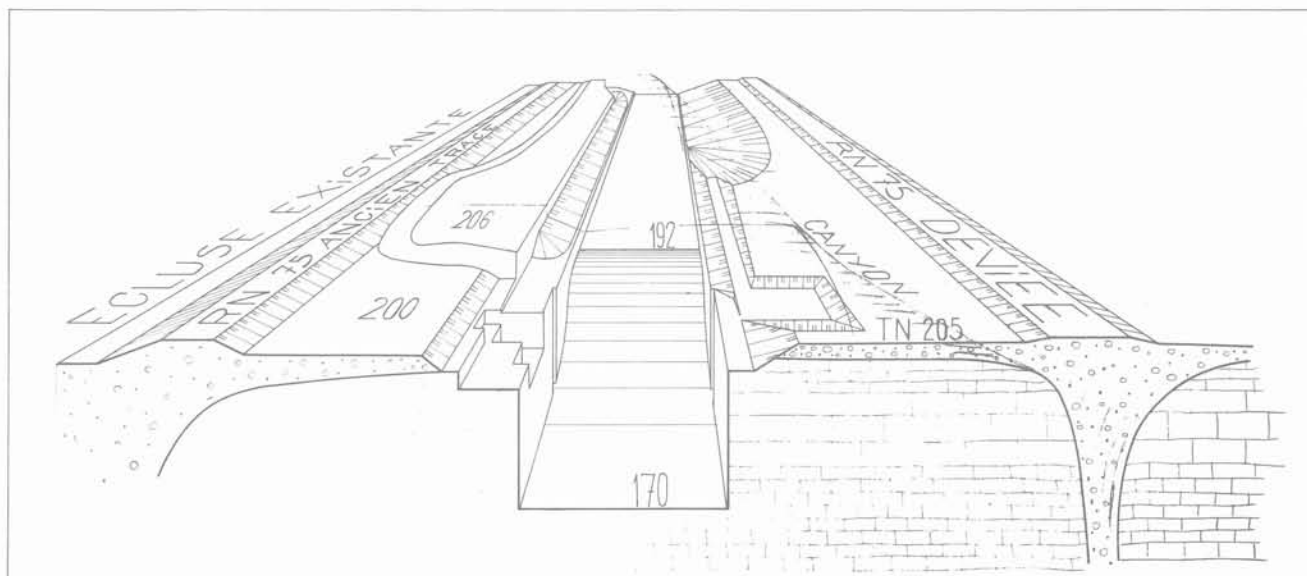


Fig. 5. — Coupe transversale au droit de l'usine montrant un cañon étroit et profond rempli d'alluvions sous la R.N. 75 déviée, complétée par une perspective des terrassements situés à l'amont.

la paroi moulée et à la proximité de voies routières, de diverses installations industrielles et du village de Sault-Brénaz.

Ces contraintes se sont traduites notamment par l'interdiction des tirs de nuit, le contrôle du niveau sonore au voisinage des habitations et un seuil de vibrations à ne pas dépasser au niveau de la paroi moulée (composante maximale de la vitesse particulaire 25 mm/s).

4. RÉALISATION DES TRAVAUX PAR L'ENTREPRISE

Cette fouille a été réalisée au cours de l'été 1984 selon le calendrier suivant :

- 1^{er} avril 1984 : ordre de service ;
- avril : installations de chantier et travaux préparatoires ;
- mai à septembre : réalisation de la fouille proprement dite ;
- 1^{re} quinzaine d'octobre : réglage des fonds de fouille.

Les quantités principales ont été :

- 250 000 m³ de déblais rocheux,
- 7 400 m² de prédécoupage,
- 20 000 kg, soit mille quatre cents boulons, dont mille environ à ancrage réparti.

Outre les contraintes d'environnement, les principales difficultés techniques rencontrées par l'entrepreneur ont été causées par la forme et l'exiguïté de la fouille, l'altération du rocher qui a compliqué les plans de tirs, la présence d'une nappe phréatique sous (196) exigeant une station de pompage mobile évoluant avec les phases de chantier, et la nécessité de trier les déblais pour récupérer les enrochements.

4.1. Méthodes d'exécution

4.1.1. Prédécoupage

Dès le début du chantier, les planches d'essais ont été réalisées selon les méthodes traditionnelles : forages de diamètre 76 ou 89 mm, espacés de 0,75 ou 0,90 m, chargés avec des cordons détonants de 40 ou 70 g/m, avec amorçage simultané en tête par cordeau maître.

Ces planches d'essais n'ayant pas donné les résultats escomptés, la méthode suivante a été mise au point par approches successives :

- la perforation, effectuée à l'aide d'une foreuse équipée d'un marteau hydraulique hors trou, comporte des forages de 102 mm de diamètre espacés de 1 m et chargés à la « cislite » (gelsurite en boudin) associée à un cordeau détonant de 10 g/m ;
- la hauteur des volées peut varier de 6 à 12 m ;

— les implantations doivent être précises afin d'éviter les hors profils ; les sous-profils sont grignotés à la pelle ou au marteau hydraulique brise-roche au fur et à mesure de l'exécution.

Les hors profils constatés en fin d'exécution ont été négligeables. Il est assez remarquable d'observer des parois de fouille rigoureusement verticales sur 30 mètres de hauteur*.

4.1.2. Minage du rocher

La foration a été assurée par deux machines Tamrock D.H.H. 850.

Après différents tirs d'essai et notamment après l'évacuation de la partie supérieure du rocher altéré sur quelques mètres, un plan type de minage a été arrêté, avec un diamètre de foration de 115 mm, un maillage de 3,50 m entre trous et de 3 m entre rangs, et un dosage moyen d'explosif de 450 g/m³ (nitrate fuel aluminisé hors d'eau, sigmagel ou gelsurite sous le niveau de la nappe). L'allumage comportait l'utilisation de micro-retards à amorçage en fond de trous, pratiquée avec le système non électrique Nonel, pour permettre un décalage des détonations sans cumul (tir séquentiel).

L'approche des parements a fait l'objet de dispositions particulières : maille réduite, meilleure répartition de l'explosif dans la masse afin de ne pas ébranler les parements prédécoupés et d'éviter toute fracturation du rocher situé à l'arrière du rideau de prédécoupage.

4.1.3. Extraction - Transport

Étant donné l'exiguïté de la fouille, 40 mètres de largeur et une longueur se réduisant au fur et à mesure de la profondeur, il n'était pas possible d'envisager plusieurs échelons d'extraction. Cette réflexion est confirmée si l'on prend en compte les contraintes suivantes :

- cohabitation du minage et de l'extraction ;
- cohabitation avec la station de pompage mobile tant que le fond de fouille n'était pas atteint ;
- constitution de pistes de sortie avec rampes à 10 % de pente ;
- nécessité de sélectionner les gros enrochements dès le chargement.

C'est pourquoi, un seul engin d'extraction a été mis en place capable d'assurer un rendement respectant les délais. Une pelle Poclain 600 C.K. équipée en rétro a assuré ce rôle avec un rendement moyen de l'ordre de 300 m³/h.

Les transports ont été assurés par des dumpers de 35 tonnes de charge utile.

Quelques moyens complémentaires ont été mis en œuvre pour assurer les travaux secondaires, à savoir une pelle Caterpillar type 235 rétro et une pelle Poclain 90 C.K. avec marteau hydraulique brise-roche de Montabert.

* Le prédécoupage a été inventé vers 1960 précisément pour ce genre de parois verticales, au canal du Niagara. Note de l'éditeur...

4.1.4. Réglage du fond de fouille

Ce réglage est obtenu par des moyens mécaniques tels que brise-roche et petite pelle hydraulique avec nettoyage éventuel à l'air comprimé ou à l'eau sous pression.

Toutefois, la stratification du rocher et son léger pendage ont obligé à dresser le fond de fouille avec une légère inclinaison de la rive droite vers la rive gauche en suivant le pendage naturel du rocher.

4.1.5. Soutènements et protections

Étant donné la fracturation du rocher et les risques d'éboulements, il a été décidé d'assurer la stabilité des parois par la mise en place de boulons d'ancrage dont l'implantation et le choix (ancrages répartis ou ponctuels), ont été faits sur observations des parois au fur et à mesure de l'exécution des déblais.

Les forations en Ø 50 mm ont été réalisées avec une machine Tamrock D.H.H.A.T. spécialement conçue pour la foration en petit diamètre.

Les boulons d'une longueur de 2 à 3 m ont essentiellement pour but d'éviter les chutes de blocs en façade et non d'assurer la stabilité générale des parois car celle-ci est, en effet, obtenue naturellement étant donné les pendages voisins de l'horizontale.

La densité moyenne a été de 1,15 boulon par 5 m² en rive droite et 0,95 boulon par 5 m² en rive gauche, ce qui s'explique par l'aspect plus torturé du parement en rive droite.

Pour protéger le personnel devant travailler à la réalisation du génie civil contre les chutes de pierres, un grillage a été mis en place sur toute la hauteur des parois avec fixation générale en tête.

Ce grillage avait pour but de canaliser les éléments rocheux de petite dimension dont la chute inopinée aurait été excessivement dangereuse.

4.2. Observations en cours d'exécution

4.2.1. Pompages

Les débits qui oscillent entre 600 et 1 000 m³/h sont assez sensibles aux variations du niveau du Rhône.

Les venues d'eau les plus significatives proviennent :

- de l'amont par contournement du bouchon de protection de l'usine avec circulation des eaux dans le canon décrit plus avant et la partie supérieure du rocher probablement assez fracturée. La majeure partie de ces eaux est recueillie au niveau (192,00) entre le bouchon et l'usine ;

- d'une circulation supposée au travers du rocher fracturé non intéressé par l'écran partiel d'étanchéité ;

- latéralement de quelques venues ponctuelles situées le long des joints de stratifications.

Les pompages sont assurés par des électropompes submersibles équipées de turbines haute pression (hauteur manométrique de refoulement de 30 mètres). La

sécurité d'alimentation électrique est assurée par le démarrage automatique d'un groupe électrogène de secours en cas de coupure sur le réseau E.D.F.

4.2.2. Vibrations

Lors de chaque tir, des contrôles sismiques ont été enregistrés. Ils ont montré que les nuisances par vibration étaient tout à fait réduites et ne pouvaient mettre en péril les constructions proches et éloignées du site (Pont de Sault-Brénaz et village entre autres).

4.2.3. Mouvements du rocher

• Dispositif d'auscultation des mouvements rocheux.

Compte tenu de la hauteur des parements rocheux, il a été décidé, dès le départ, de surveiller les mouvements du massif rocheux.

Pour ce faire on a mis en place un réseau de quatre socles en béton (2 en rive gauche, 2 en rive droite), permettant un suivi topographique de précision et munis chacun d'un système de nivelles orthogonales. Chacun de ces socles surmonte un tube inclinométrique scellé dans un forage descendant en dessous du fond de fouille.

Ce dispositif initial a été complété pendant les travaux par un réseau de quinze fissuromètres permettant, en mesurant les variations d'épaisseur des fissures en surface, de surveiller des dièdres présumés instables en tête des parements, et par un extensomètre à points multiples de 16 m de long placé dans un forage qui contrôle deux fissures délimitant un coin rocheux de volume important en rive droite.

• Mouvements observés :

- *Nivelles* : les déplacements mesurés ont montré un léger déplacement par basculement des têtes de fouille vers le vide.

- *Inclinomètres* : globalement ils ont montré la stabilité générale de la fouille ; cependant les mouvements des bancs les uns par rapport aux autres ont pu être mis en évidence notamment en rive gauche du fait du pendage légèrement incliné vers la fouille.

Un de ces mouvements a conduit au cisaillement d'un des tubes inclinométriques à 7 m de profondeur ce qui a conduit à purger ce banc qui glissait. Notons que ce mouvement a été détecté très tôt ce qui a permis d'assurer la purge avant approfondissement ultérieur de la fouille.

- *Extensomètre* : les mesures avant et après tirs ont montré que ceux-ci avaient peu d'influence sur l'ouverture des fissures au sein du massif rocheux, les mouvements restant dans un domaine quasi élastique (1/10 mm). En revanche l'approfondissement de la fouille a ouvert les deux fissures de 0,5 mm environ. Cette valeur stabilisée à l'arrêt de l'excavation, a encore doublé lors du dégel du mois de janvier 1985.

- *Fissuromètres* : globalement les mouvements sont restés faibles (inférieurs au mm) toutefois, certaines mesures ont mis en évidence des déplacements locaux importants et un boulonnage complémentaire a été

défini pour bloquer les dièdres en mouvements (boulons verticaux).

4.2.4. Autre observation

A la fin des terrassements rocheux un effondrement des terrains alluvionnaires de remplissage du canon de rive gauche a fait apparaître, en rive gauche du canal d'amenée, à 150 m environ de la partie profonde de la fouille rocheuse, une cavité d'environ 5 m de profondeur. Cet effondrement, qui a vraisemblablement pour origine le décolmatage de certains conduits karstiques consécutif aux pompages au niveau le plus bas de la fouille, s'est rapidement stabilisé.

4.3. Récupération des matériaux

Il était prévu que les déblais rocheux serviraient à la fabrication d'enrochements calibrés pour réaliser les protections des berges de l'aménagement; l'objectif étant de récupérer environ 50 % du tonnage extrait, avec les classes de poids suivantes :

5/25 kg, 10/100 kg, 100/400 kg, 400/1 800 kg.

Les deux premières catégories (5/25 à 10/100) ont d'abord été sélectionnées visuellement lors de la mise en dépôt en favorisant la ségrégation, par déchargement des dumpers au sommet d'une berge verticale de 3 à 4 mètres de hauteur et récupération à la chargeuse des matériaux en pied du dépôt. Cette méthode a été utilisée au début du chantier pendant les mois de mai et juin 1984 en attendant l'installation d'une grille de criblage implantée au niveau (192) N.G.F. entre le bouchon amont et l'usine. Pendant cette période, ce sont

les matériaux de surface qui étaient exploités; leur nature (rocher altéré) n'a pas permis un taux de récupération élevé. Ensuite la sélection a été obtenue par passage sur une grille statique, de $8,20 \times 5,50$ m avec un espacement entre barreaux de 0,20 m, qui a pu être opérationnelle au début du mois de juillet au moment où les qualités du rocher devaient permettre un meilleur taux de récupération; celui-ci n'a cependant pas été aussi élevé qu'on l'avait espéré à cause de la fragilité du rocher et de sa stratification horizontale très marquée.

Les deux autres catégories (100/400 et 400/1 800 kg) ont été obtenues par un tri visuel lors de l'extraction. Ces matériaux sont en effet facilement identifiables et faciles à sélectionner par un conducteur de pelle habile.

CONCLUSION

Les travaux de terrassements rocheux qui constituent une étape importante du chantier de réalisation de l'usine hydro-électrique de Sault-Brénaz, se sont déroulés dans des conditions satisfaisantes. Les délais ont été respectés, il n'y a eu à signaler aucun accident, la tenue des parois de la fouille est correcte et le volume attendu des purges faible.

Le seuil maximal de vibrations imposé à l'entrepreneur n'a jamais été dépassé.

Le terrassement n'ayant recoupé aucun écoulement dans des conduits karstiques, les venues d'eau ont été plus faibles que prévu.

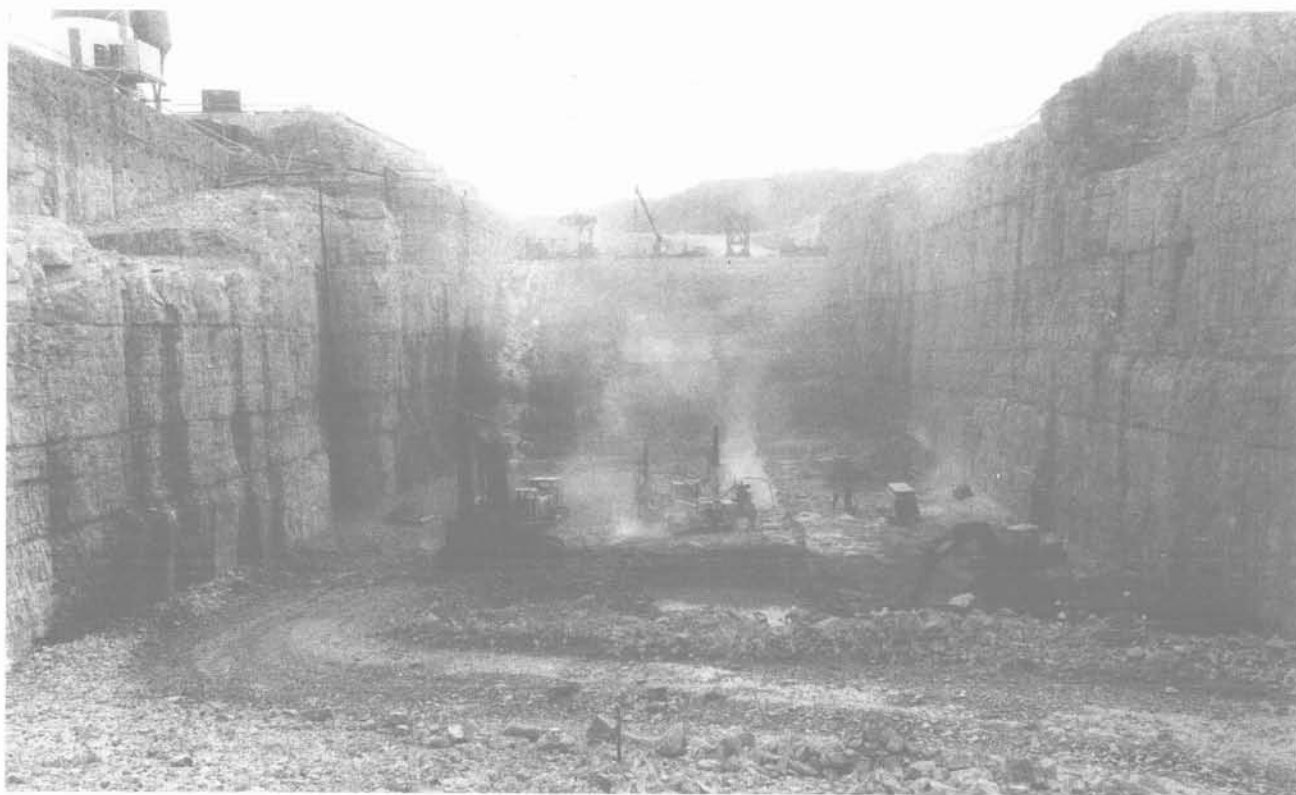


Fig. 6. — Fouille de l'usine vue d'aval.